

Conference Paper, Published Version

Kauther, Regina; Neumann, Sven; Herten, Markus

Geotechnische Messungen bei der Baugrubenherstellung für die neue Weserschleuse Minden

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/100915>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Kauther, Regina; Neumann, Sven; Herten, Markus (2013): Geotechnische Messungen bei der Baugrubenherstellung für die neue Weserschleuse Minden. In: TAE 2014 - Bauen in Boden und Fels, 9. Kolloquium 14 und 15. Januar 2014. Ostfildern: Technische Akademie Esslingen. S. 51-60.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Geotechnische Messungen bei der Baugrubenherstellung für die neue Weserschleuse Minden

Regina Kauther
Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, Deutschland

Sven Neumann
Neubauamt für den Ausbau des Mittellandkanals in Hannover, Deutschland

Markus Herten
Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, Deutschland

Zusammenfassung

In Minden wird derzeit neben der bereits 100 Jahre alten Schachtschleuse die neue Weserschleuse errichtet. Der Baugrubenverbau besteht auf der der Schachtschleuse zugewandten Seite (Westseite) aus einer vierfach rückverankerten, überschrittenen 20 m tiefen Bohrpfehlwand. Auf der Ostseite wurde eine geböschte Baugrubenwand ausgeführt. Zur Einschränkung des Grundwasserzustroms zur Baugrube und zur Reduzierung des Grundwasserdrucks auf die Bohrpfehlwand wurde zusätzlich eine Wasserhaltung betrieben. Der Schiffsverkehr durch die Schachtschleuse wird während der gesamten Bauzeit aufrechterhalten und darf durch den Aushub der Baugrube nicht beeinträchtigt oder gefährdet werden. Mit dem für die Bauaufgabe konzipierten geotechnischen Messkonzept wird die Interaktion zwischen Baumaßnahme und Bestandsbauwerk beobachtet und so die Risiken für die Baumaßnahme minimiert.

1. Projektbeschreibung

Der Mittellandkanal (MLK) kreuzt bei Minden in Westfalen das rund 3 km breite Wesertal. An der Kreuzungsstelle liegt der Kanalwasserspiegel rund 13 m über dem Mittelwasserstand der Weser und rund 10 m über dem umgebenden Gelände. Der Auf- bzw. Abstieg für die Schifffahrt wird derzeit über die zwischen 1911 und 1914 erbaute Schachtschleuse bewerkstelligt. Im Zuge der Anpassung der Mittelweser an größere Schiffseinheiten wird das Wasserstraßenkreuz Minden ausgebaut und die Schachtschleuse durch einen Neubau ersetzt. Der Neubau wird östlich der bestehenden Schachtschleuse als Sparschleuse errichtet. Der Achsabstand von 52 m zwischen dem alten und dem neuen Bauwerk wurde unter fahrdynamischen Aspekten mit dem Ziel möglichst optimaler Ein- und Ausfahrtbedingungen für die Schifffahrt festgelegt. Planungsseckdaten für die neue Schleuse sind die nutzbare Kammerlänge mit 139 m, die Kammerbreite mit 12,5 m und eine Drempeltiefe von 4 m. Der Bauherr, das Neubauamt für den Ausbau des Mittellandkanals in Hannover, beauftragte die Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) in Karlsruhe mit der Erstellung des Geotechnischen Berichtes, des hydrogeologischen und des geohydraulischen Gutachtens sowie mit der baubegleitenden Beratung. Die Bauausführung wurde im Jahr 2010 an die Johann Bunte Bauunternehmung GmbH & Co KG vergeben. Bild 1 gibt einen Überblick über die örtlichen Gegebenheiten mit der bestehenden Schachtschleuse, dem für die neue Weserschleuse vorgesehenen Baugelände sowie den angrenzenden Wasserflächen.



Bild 1: Luftbild mit der bestehenden Schachtschleuse in Minden und dem Baugelände für die neue Weserschleuse (Quelle: Wasser- und Schifffahrtsverwaltung)

Die Gründung der bestehenden Schachtschleuse erfolgte in einer beidseits geböschten Baugrube im anstehenden Fels. Nach dem Bau der Schachtschleuse wurde das umliegende Gelände um ca. 10 m aufgefüllt und der Mittellandkanal mit dem Oberen Vorhafen hergestellt. Für den Entwurf der Baugrube der neuen Weserschleuse waren im Vergleich zum Bau der Schachtschleuse eine Reihe wesentlich geänderter Randbedingungen zu beachten: Die Gründungssohle der neuen Schleuse liegt drei Meter unterhalb der Sohle der Schachtschleuse, womit die Baugrube eine maximale Tiefe von 23 m am Oberhaupt sowie von 16 m im Bereich der Kammer und am Unterhaupt besitzt.

Die Baugrube liegt auch nicht mehr, wie beim Bau der Schachtschleuse, auf einer „nassen Wiese“, sondern in unmittelbarer Nachbarschaft zu einem bestehenden Bauwerk. Der Schiffsverkehr durch die Schachtschleuse wird während der gesamten Bauzeit aufrechterhalten und darf deshalb durch den Aushub der benachbarten Baugrube nicht beeinträchtigt oder gefährdet werden. Eine weitere Vorgabe war der Schutz der Baugrube gegen ein 100-jährliches Hochwasser der (staugeregelten) Weser. Da die Baugrubenumschließung in die Wasserflächen des Oberen und des Unteren Vorhafens einschneidet, sind Undichtigkeiten in der 18 m über der Baugrubensohle liegenden Kanaldichtung des Oberen Vorhafens sowie mögliche Leckagen infolge einer Anfahrung der Baugrubenumschließungswände durch Schiffe explizit zu berücksichtigen. In beiden Fällen ist die Standsicherheit des Baugrubenverbaues sicherzustellen.

2. Baugrundverhältnisse und Grundwasser

Der Baugrund im Bereich der geplanten Schleusenanlage kann vereinfacht in drei Schichten unterteilt werden. Direkt unter der Geländeoberkante stehen in einer Schichtmächtigkeit von bis zu 12 m Auffüllungen aus natürlichen Böden der Umgebung (Schluffe, Sande, Kiese) an. Diese werden von einer Auelehmschicht in geringer Schichtdicke sowie von einer Sand- und Kies-schicht mit überwiegend großer Lagerungsdichte in einer Schichtmächtigkeit bis zu 3,5 m unterlagert. Unter diesen quartären Schichten folgen tertiäre Tonsteine, deren Schichtmächtigkeit bis zur Endteufe der Baugrundaufschlüsse reicht. Der in Minden anstehende Tonstein ist ein veränderlich festes Gestein. Er besitzt ein ausgeprägtes orthogonales Trennflächensystem. Dieses besteht aus der flach einfallenden Schichtung und steilen Kluftflächen mit Neigungen zwischen 45° und 90° . Die Gesteinsfestigkeit wurde aus den einaxialen Druckversuchen im Labor ermittelt. Die einaxiale Druckfestigkeit beträgt in vertikaler Orientierung im arithmetischen Mittel $q_{u,m} = 7,7 \text{ MN/m}^2$ (34 Proben) und in horizontaler Richtung $q_{u,m} = 9,2 \text{ MN/m}^2$ (42 Proben). Die Elastizitätsmoduln für den Fels wurden in situ mit Hilfe von Bohrlochaufweitungsversuchen, bohrlochphysikalischen Messungen und Crossholetests sowie im Labor auf der Grundlage der Messwerte aus den Einaxialen Druckversuche bestimmt. Die Festigkeitsparameter für das Gestein, den Fels und die Trennflächen wurden anhand von Scherversuchen in situ und im Labor ermittelt.

Das Grundwasser strömt großräumig von Westen zur Weser, die den regionalen Hauptvorfluter darstellt. Die Durchlässigkeit der quartären Sedimente wurde auf der Grundlage von Laborversuchen in der Größenordnung von $k = 10^{-3} \text{ m/s}$ bestimmt. Pumpversuche sowie hydraulische Pulse-Tests im Tonstein ergaben Gebirgsdurchlässigkeiten im Bereich von $k = 2 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$, die

auf den hohen Durchtrennungsgrad der Schicht- und Kluftflächen im Tonstein zurückzuführen sind.

3. Baugrubenkonzept

Der Entwurf der Baugrube für die neue Schleuse erfolgte auf Grundlage einer Machbarkeitsstudie, in der verschiedene Konzepte hinsichtlich ihrer Kosten und der Sicherheit der Ausführung bewertet wurden. Vorberechnungen ergaben, dass eine Rückverankerung einer dichten Verbauwand auf der Westseite der Baugrube aufgrund des hohen Grundwasserstands und der hier maximal zulässigen Gebrauchskraft für die Anker von 1000 kN im Tonstein nicht zu realisieren war. Um eine damit erforderliche Aussteifung der Baugrube zu vermeiden und eine geböschte Baugrube im Fels auf der (unbebauten) Ostseite realisieren zu können, musste der Grundwasserdruck auf den Baugrubenverbau reduziert werden. Dazu war es notwendig, sowohl den Grundwasserzufluss zur Baugrube in den gut durchlässigen quartären Schichten zu unterbinden als auch das Grundwasserpotential im klüftigen Fels zu reduzieren. Insbesondere waren auch mögliche Hochwässer der Weser zu berücksichtigen, da Wasserspiegelschwankungen in der Weser auch rasche Änderungen des Porenwasserdrucks im gesättigten Tonstein bewirken.

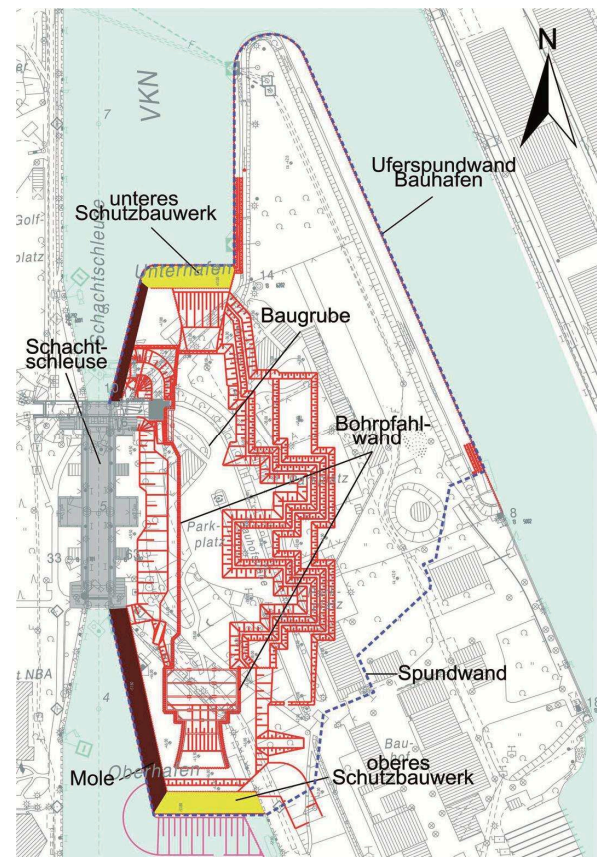


Bild 2: Lageplan der Baugrube mit Baugrubenumschließung

Der Grundwasserzufluss aus den quartären Schichten wurde durch eine bis in den Tonstein reichende Baugrubenumschließung unterbunden. Als Dichtelemente dienen die ebenfalls im Tonstein gegründete Schachtschleuse auf der Westseite, die Spundwände der Fangedämme für die zukünftige Mole, die Spundwände der Schutzbauwerke im Oberen und unteren Vorhafen, die (neue) Uferspundwand des Bauhafens auf der Ostseite sowie eine temporäre Spundwand für den Lückenschluss zwischen Bauhafen und oberem Schutzbauwerk. Das Bild 2 zeigt die Lage der Baugrube zusammen mit den beschriebenen Dichtelementen.

Zur Reduzierung des Grundwasserdrucks auf die Bohrpfahlwand im Fels wurde eine Grundwasserabsenkanlage hinter der Bohrpfahlwand installiert. Die Dimensionierung der Grundwasserabsenkungsanlage ergab eine erforderliche Anzahl von 35 Brunnen im Abstand von 8 m [5]. Dadurch konnte auf der Westseite der Baugrube ein verformungsarmer Verbau durch eine 4-fach rückverankerte, überschnittene Bohrpfahlwand mit einem Pfahldurchmesser von 1,2 m und auf der Ostseite eine geböschte Baugrube hergestellt werden. Lediglich im Bereich des Schleusenoberhauptes, in dem ein Abtrag der Kräfte durch Anker aufgrund der Fangedamm-spundwände aus geometrischen Gründen nicht möglich war, erfolgte der Verbau durch eine beidseitig angeordnete Bohrpfahlwand in Kombination mit einer zweifachen Aussteifung in den oberen und einer zweifachen Rückverankerungen in den unteren Lagen.

Die Baugrubenböschungen auf der Ostseite weisen im Fels eine maximale Neigung von 70° gegen die Horizontale auf. Die darüber liegenden quartären Bodenschichten wurden flacher mit einer Neigung von 1:1,5 bis 1:2 geböschst. Die Entwässerung der Böschungen im Fels erfolgt über Entspannungsbohrungen, die in zwei Lagen und in einem Abstand von 2 m hergestellt wurden. Bild 3 zeigt die gewählten Verbauelemente und die Baugrube im Zustand des Endaushubs.



Bild 3: Blick in die Baugrube nach Süden (Quelle: Wasser- und Schifffahrtsverwaltung)

Einen wesentlichen Bestandteil der Baugrubenumschließung bilden die beiden als Kastenfangedamm ausgeführten Schutzbauwerke im oberen und unteren Vorhafen (siehe Bild 2). Im Vergleich zum Fangedamm im unteren Vorhafen ist das Gefahrenpotential wegen der Wasserspiegeldifferenz zur Baugrubensohle von 23 m bei einem Versagen des Fangedamms im oberen Vorhafen und der Möglichkeit eines Leerlaufens der dahinterliegenden Kanalhaltung in die Baugrube groß.

4. Messtechnische Überwachung/Beweissicherung

Auf Grundlage der Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugruben“ EAB [1] wurde von der BAW ein umfangreiches Messkonzept zur Ausführung empfohlen. Die messtechnische Überwachung dient der Minimierung von Risiken, da ungünstigen Entwicklungen rechtzeitig entgegengewirkt werden kann und liefert Daten, auf deren Grundlage der Einfluss der Baumaßnahme auf die angrenzende Bebauung beurteilt wird kann. Das Messkonzept ist Bestandteil der Qualitätssicherung der Baumaßnahme während des Aushubs und der Nutzung der Baugrube.

Die messtechnische Überwachung umfasst bautechnische, geotechnische und geohydraulische Messungen. Dem Umfang und Auswahl der Messorte, Art der Messungen und die Frequenz der Messungen liegen Überlegungen zu den möglichen (denkbaren) bautechnischen und geotechnischen Risiken für die Baumaßnahme zu Grunde. Daraus ergaben sich folgende messtechnische Aufgaben:

1. Überwachung der Wasserhaltung und Kontrolle der zulässigen Grundwasserdrücke auf die Bohrpfahlwand zur Gewährleistung ihrer Gebrauchstauglichkeit und Standsicherheit
2. Beobachtung der Grundwasserdrücke im oberen Schutzbauwerk zur Feststellung von Leckagen
3. Kontrolle der Verformungen der Schachtschleuse zur Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit des Bauwerks
4. Monitoring der Verformungen des Baugrubenverbau (Bohrpfahlwand, Fangedamm) einschließlich der Kontrolle der Anker- und Steifenkräfte

Mit der Messung von Bauwerksverformungen und von Grundwasserständen muss rechtzeitig vor Beginn der Baumaßnahme begonnen werden, da diese jahreszeitlich beeinflusst sind und nur so das „normale Verhalten“ festgestellt werden kann. Bauwerke, deren Dichtigkeit während der Baumaßnahme beobachtet werden soll, wie hier z.B. die Absperrbauwerke im unteren und oberen Vorhafen, müssen nach ihrer Erstellung auf ihre Systemdichtigkeit geprüft werden.

Das Messkonzept sieht sowohl sensorische und händische als auch geodätische Messungen vor. Sensorische

Verfahren gewährleisten eine kontinuierliche Beobachtung und im Zusammenwirken mit der eingesetzten Auswertelogistik eine rund um die Uhr verlässliche Überwachungsmethode. Die geodätischen und händischen Messungen werden individuell in zeitlichen Abständen ausgeführt, so dass eine nachteilige Entwicklung rechtzeitig erkannt wird. Im Bereich der Baugrube und der Schachtschleuse ergibt erst die Kombination von sensorischen und manuellen Verfahren aufgrund der Redundanz den notwendigen Umfang an Informationen [4].

Die geotechnischen und die geohydraulischen Messungen wurden – soweit möglich und sinnvoll – in Messquerschnitten konzentriert, so dass Messergebnisse im Zusammenhang interpretiert werden und die Wechselwirkungen zwischen Bauwerksverschiebungen, Baugrundverformungen und Grundwasserpotential möglichst schnell erkannt werden können. Die Lage der Messquerschnitte ist in Bild 4 dargestellt.

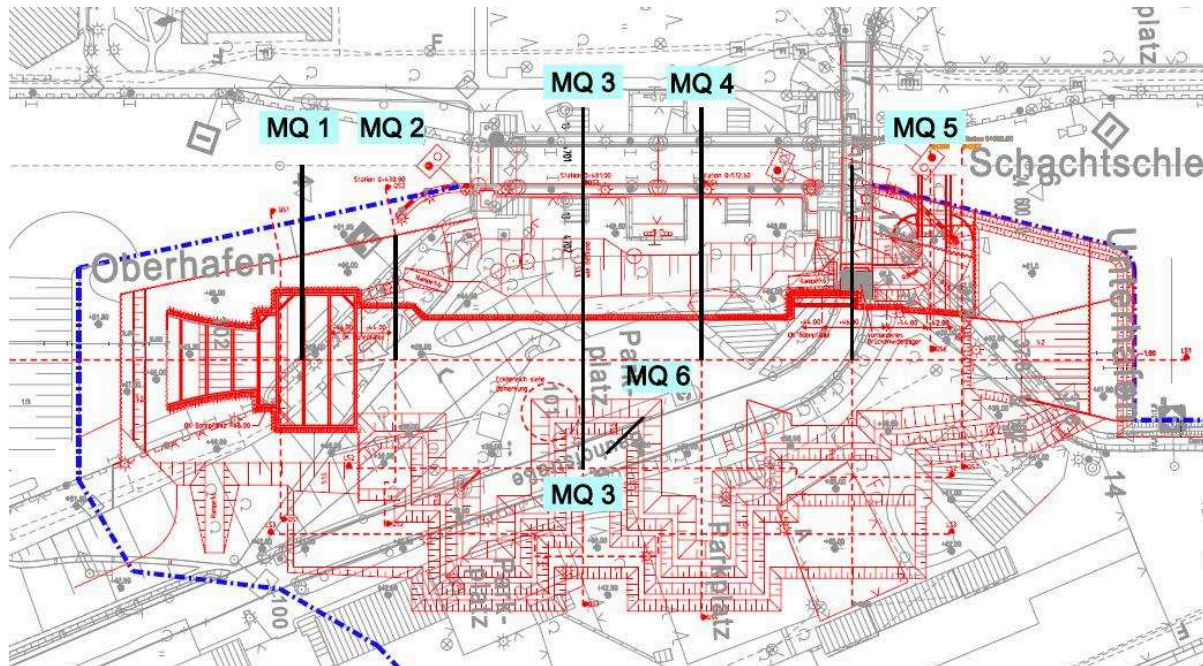


Bild 4: Lageplan der Baugrube mit den Messquerschnitten

4.1 Geotechnisches Messkonzept

Um die beschriebenen Messaufgaben zu erfüllen, werden die vertikalen und horizontalen Verformungen der Bohrpfahlwand einschließlich der Verformungen des dahinter und davor anstehenden Bodenbereiches, die Anker- und Steifenkräfte und der Grundwasserstand unmittelbar hinter der Bohrpfahlwand erfasst.

Zur Messung der vertikalen Verformung der Bohrpfähle in den Messquerschnitten dient ein Zweifachstangenextensometer. Das Extensometer wird dabei innerhalb einer Bohrung installiert, die durch ein an der Bewehrung eines Sekundärpfahls befestigtes Leerrohr bis in eine Tiefe von 10 m unter dem Fußpunkt des Bohrpfahls ausgeführt wurde. Die Verankerungspunkte des Extensometers sind jeweils am Fuß des Bohrpfahls (Länge der Stange 23 m (Messquerschnitt 1) bzw. 21 m (Messquerschnitte 2-5)) und 10 m unterhalb des Fußes des Bohrpfahls (Länge der Stange 33 m (Messquerschnitt 1) bzw. 31 m (Messquerschnitte 2-5)) positioniert.

Zur Überwachung der Verformungen im Bodenbereich hinter der Bohrpfahlwand wurden schräge Drei- und Vierfachstangenextensometer installiert. Die Extensometer wurden am Kopf des Bohrpfahls mit einer maximalen Länge von 65 m und in Höhe der zweiten Ankerlage mit einer maximalen Länge von 24 m eingebaut. Die Neigung beider Extensometer beträgt 30° zur Horizontalen. In drei der fünf Messquerschnitte wurden in einem Abstand von 2,5 m von der neuen Schleusenachse vertikale Dreifachstangenextensometer mit Längen von 7 m, 15 m und 25 m installiert. Die Extensometer wurden vor Beginn des Baugrubenaushubs direkt unter die Konstruktionssohle eingebaut und messen sowohl die Hebungen der Baugrubensohle als auch die späteren Bauwerkssetzungen. Zur Ermittlung der tiefenabhängigen Horizontalverformungen der Bohrpfahlwand werden Inklinometer verwendet. Die Inklinometer reichen ebenfalls bis 10 m unter den Bohrpfahlfuß.

Die Inklinometerrohre werden in der Regel einmal pro Woche, während besonderer Bauzustände sogar täglich mit einer Kabelsonde durchfahren. Alle anderen Senso-

ren werden in einem Abstand von 20 Minuten automatisch ausgelesen. Ergänzend wurden am Kopf der Bohrpfahlwand und in Höhe der Anker- und Extensometerköpfe Messpunkte zur geodätischen Setzungs- und Lagebeobachtung eingerichtet. In den Messquerschnitten werden die Kräfte aller Anker der verschiedenen Ankerlagen gemessen. Die Messung der Ankerkräfte erfolgt mittels hydraulischer Ankerkraftsensoren mit einem Messbereich bis 2000 kN, die mit einem zusätzlichen Temperatursensor ausgestattet sind. Insgesamt werden die Ankerkräfte an 33 Ankern gemessen. Im Messquerschnitt 1 am Oberhaupt werden die Ankerkräfte in den zwei Ankerlagen und die Steifenkräfte erfasst.

Für die Messung der Steifenkräfte werden Kapselpressen verwendet. Der Messbereich der Kapselpressen mit einem Maximalwert von 10 MN entspricht der doppelten Gebrauchslast. Der Flüssigkeitsdruck in der Kapselpresse wird mit elektrischen Drucksensoren gemessen. Der Zusammenhang zwischen Flüssigkeitsdruck

und Kraft wird über eine Kalibrierung jeder einzelnen Presse ermittelt. Zur Minderung der Zwangskräfte aus Temperatur wurden alle Steifen mit einem reflektierenden weißen Anstrich versehen.

Auf der Ostseite der Baugrube wurden außer einer Vielzahl von geodätischen Messpunkten zur Setzungs- und Lagebeobachtung der Böschung zwei Messquerschnitte mit Extensometern bestückt. In den beiden Messquerschnitten wurden jeweils zwei Dreifachstangenextensometer mit maximalen Längen von 15 m und einer Neigung von 20° gegen die Horizontale verwendet. Zur Erfassung einer räumlichen Böschungssituation an der Ecke zwischen der Hauptbaugrube und der Baugrube für den nördlichen Sparbeckenzulaufkanal (siehe Bild 4) wurde ein Extensometer unter einer Neigung von 45° gegen die Kammerlängsachse in einer ausspringenden Ecke der Baugrubenböschung eingebaut (Messquerschnitt 6). Im Bild 5 ist als Beispiel dieser Instrumentierung des Messquerschnitts 3 auf der Ost- und auf Westseite dargestellt.

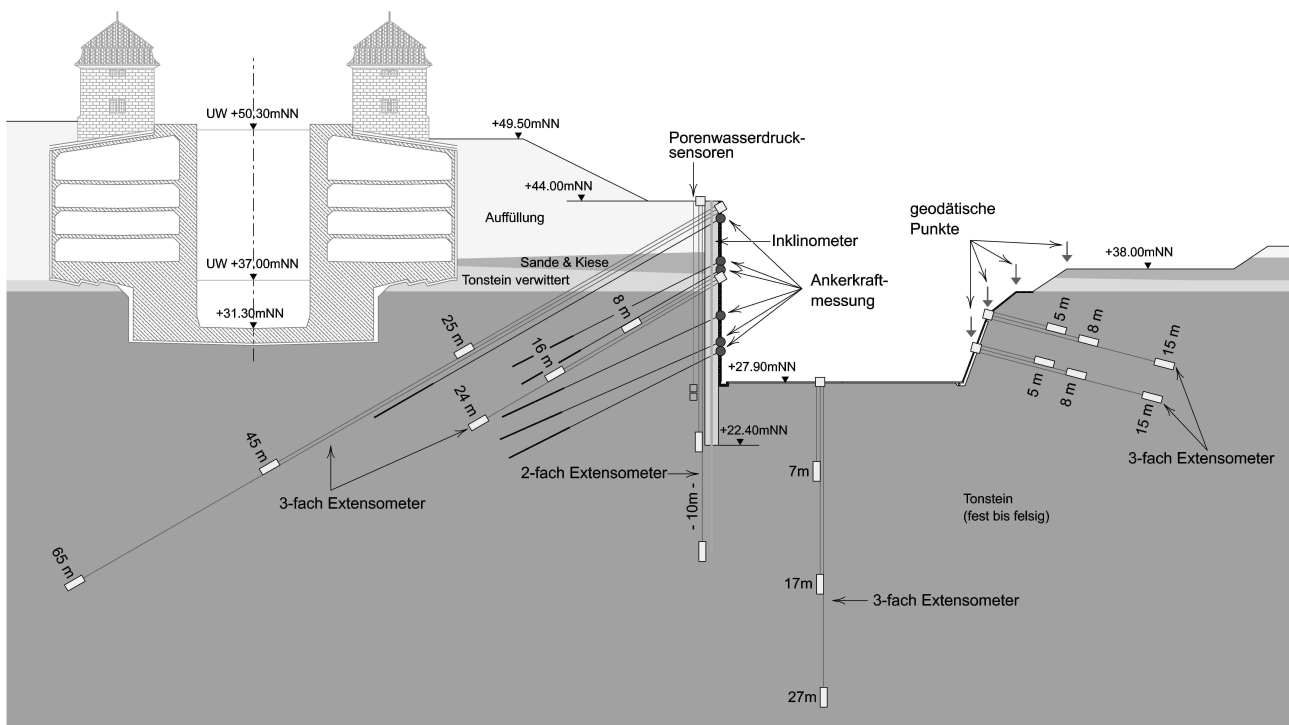


Bild 5: Instrumentierung des Messquerschnitts 3 (Quelle: Wasser- und Schifffahrtsverwaltung)

Das Grundwassermonitoringsystem zur Überwachung der Wasserhaltung umfasste sämtliche Entnahmefrühen sowie die für die Grundwasserabsenkung relevanten Grundwassermessstellen hinter der Bohrpfahlwand. Die Regelung der Pumpen in den Entnahmefrühen erfolgte durch jeweils einen Frequenzumformer auf Grundlage der Messwerte eines unterhalb der Pumpe im Brunnenrohr angeordneten Druckaufnehmers. Zusätzlich zur automatisierten Pumpensteuerung und

Fehlermeldung waren alle Brunnen mit einem optischen und akustischen Signalgeber ausgestattet [5].

Zusätzlich zu den geotechnischen Messungen erfolgte die Ausrüstung der Schachtschleuse mit Neigungssensoren und Wegaufnehmern entlang der beiden Kammerwände zur Messung der Änderungen des Fugenversatzes und der Fugenweite. Darüber hinaus sind Vorrichtungen zur Messung der Kammerweiten mit einem Konvergenzmessband eingebaut. In den Wänden auf der Höhe der zweiten Ebene der östlichen Sparbe-

ckenkammer wurden zwei Temperaturmessketten zur Überwachung der Gebäudetemperatur eingebracht (Bild 6). Die Schachtschleuse ist an der Außenseite, auf der Schleusenplanie, am Unterhaupt und auf der Kammersohle ebenfalls mit geodätischen Messpunkten ausgerüstet.



Bild 6: Instrumentierung der Schachtschleuse (Quelle: Wasser- und Schifffahrtsverwaltung)

Die Messwerterfassung der Neigungssensoren, der Wegaufnehmer und der Temperaturketten erfolgt automatisch. Die Messung der Kammerweiten erfolgt händisch. Die ermittelten Messwerte aus der Kammerweitenmessung werden aufgrund der meteorologischen Gegebenheiten korrigiert. Die geodätischen Messungen erfolgen mittels Nivellier und Tachymeter.

4.2 Ausschreibung der geotechnischen Messungen

Die Ausschreibung enthält detaillierte Verfahrensvorgaben zu den messtechnischen Leistungen der Bereiche Geomesstechnik und Überwachung. Da diese Leistungen einen hohen bautechnischen Anteil beinhalten und zudem sehr eng mit den Arbeiten zur Herstellung der Baugrube verzahnt sind, wurden sie in den Bauvertrag aufgenommen. Mit der Übertragung der messtechnischen Leistungen an die Baufirma ergibt sich ein ganz wichtiger Vorteil für den Auftraggeber: Die Baufirma hat stets und nachweislich Kenntnis aller messtechnisch ermittelten Zustände. Für den Auftraggeber entfallen die Beweislast und der hierfür erforderliche Schriftwechsel bei Widersprüchen gegen die von Dritten ausgeführten Messungen. Ein weiteres Argument für die

direkte Vergabe ist die dadurch entfallende Koordination der Leistungen.

In ihren Angeboten hatten alle Bieter Angaben über die vorgesehenen Fachfirmen für die Leistungen der Bereiche Geomesstechnik und Überwachung vorzulegen und deren Eignung und Leistungsfähigkeit mit Angaben der Qualifikation und Referenzprojekten zu belegen. Die Firmen ANGERMEIER Ingenieure GmbH, Giebelstadt, und GLÖTZL Baumesstechnik GmbH, Rheinstetten, führen die messtechnischen Leistungen im Nachunternehmerverhältnis aus.

Für alle messtechnischen Maßnahmen wird von den Fachfirmen zunächst ein Messprogramm aufgestellt. Es beschreibt die konkrete bautechnische Aufgabenstellung mit deren messtechnischen Umsetzung. Wesentlicher Bestandteil sind Verfahrensvorgaben, die für eine qualifizierte und angemessen schnelle Ergebnisbewertung anzuwenden sind. Der qualitative Anspruch aller Messungen folgt aus den oben beschriebenen Vorgaben. Entsprechend wird die bautechnische Qualitätsforderung als kleinster nachzuweisender Veränderungsbeitrag oder Trendindikator definiert. Die hierzu erforderliche messtechnische Qualität lässt sich aus dieser Größe ableiten. Das fertige Messprogramm wird vom Auftraggeber geprüft und freigegeben.

Die vertragliche Definition und Ausführung dieses vielseitigen Leistungsbereiches ist in einer umfassenden Matrix organisiert. Zum Zeitpunkt der Auftragsvergabe enthält diese Matrix die bis dahin bekannten Parameter für jeden Messwert. Neben allen bau- und messtechnischen Qualitätsvorgaben gibt die Matrix Prognosewerte, kritische Werte, Reaktionswerte, Messintervalle mit Bauphasenbezug vor und beschreibt die Anforderungen an die Auswertung und Ergebnisdokumentation. Die in der Tabelle enthaltenen Prognosewerte wurden im Wesentlichen auf der Grundlage von geotechnischen und geohydraulischen Finite-Element-Berechnungen erarbeitet. Die Bieter kalkulieren ihre Leistungen nach der unveränderlichen Messqualität und der Dauer bzw. Anzahl der Messungen. Die Matrix wird im Verlauf der Bauausführung stets auf neue Erkenntnisse angepasst und in ihrer aktualisierten Fassung angewendet.

4.3 Umsetzung der geotechnischen Messeinrichtungen (Einbau)

Eine Baugrube mit präziser Messtechnik auszurüsten ist stets problematisch. Schwere Baugeräte treffen unter schwierigen Bedingungen auf Messziele, Sensoren und Datenleitungen. Vom bau- und messtechnischen Personal wird viel Aufmerksamkeit und gegenseitige Rücksichtnahme verlangt, bis die Messtechnik Zug um Zug mit der entstehenden Baugrube in Betrieb genommen werden kann.

Mit der messtechnischen Ausrüstung der angrenzenden Bauwerke (Schachtschleuse, Unterhauptbrücke) konnte sofort nach der Beauftragung des Bauvorhabens begonnen werden. Parallel dazu wurden die Einbaukonzepte für besonders problematische Vorgänge von der Baufirma aufgestellt und nach Prüfläufen zur Ausführung freigegeben.

Beispielhaft für die Realisierung der unterschiedlichen Messverfahren unter den erschwerten Bedingungen der entstehenden Baugrube sind zu erwähnen:

Sohlextensometer

Nach Abtrag des Oberbodens und vor Beginn des ersten Aushubschrittes wurden drei Mehrfachextensometer an verschiedenen Achspunkten unter die künftige Baugrubensohle eingebaut und in Betrieb genommen. Der Einbau des vorkonfektionierten Messgerätes hatte nach konkreten Vorgaben des Einbaukonzeptes zu erfolgen. Für den späteren Anschluss an die Messanlage war der Messkopf zunächst mit einem Datenlogger gekoppelt, der in der Zeit des Aushubs regelmäßig ausgelesen werden musste. Nach Herstellung der Baugrubensohle konnte die Datenleitung in Endlage an die Messwertfassungsanlage angeschlossen werden.

Schrägextensometer

Die Extensometer wurden in Längen bis zu 65 Meter auf verschiedenen Horizonten schräg durch die Bohrpfähle eingebaut und der Messkopf in den Bohrpfählen fest vergossen. Wegen des stark klüftigen Tonsteins konnten die ursprünglich vorgesehenen Rippenstahlanker nicht ausgeführt werden. Die Verankerung wurde auf Packer umgestellt und ohne Probleme hergestellt.

Die örtliche Nähe von Ankern, Brunnen und Extensometern erforderte eine besonders hohe Präzision bei der Ausführung jeder Bohrung. Im Zuge der Ausführungsplanung mussten Kollisionspunkte als räumliche Schnitte ermittelt und durch Neigungsänderung oder Verschwenkung der Bohrachsen beseitigt werden. Mit speziellen Messverfahren war die Überwachung und aktive Steuerung kritischer Bohrungen erforderlich.

Inklinometer

Jeder Messquerschnitt ist mit einem Inklinometermessrohr ausgestattet, das regelmäßig mit einer Kabelsonde durchfahren wird. Der Einbau erfolgte jeweils in die bewehrten Sekundär-Bohrpfähle. Zur Aufnahme des Messrohres musste ein Stahlrohr über die ganze Länge vertikal in den Bewehrungskorb eingebaut werden. Nach der Betonage des Bohrpfahls wurde im Schutz des Stahlrohres eine Bohrung bis 10 Meter unter die Bohrpfahlssole abgeteuft. Unter Wasserüberdruck wurde das Messrohr in die wasserführende Bohrung eingesetzt und der Ringraum im Kontraktorverfahren auf ganzer Länge mit Zementsuspension gefüllt.

4.4 Messwertverarbeitung

Die Messwertverarbeitung aller sensorischen, geodätischen und händischen Messwerte gliedert sich in die Bereiche Erfassung, Auswertung, Archivierung und Ergebnispräsentation. Zur Erfassung der Sensordaten werden Messanlagen für die Schachtschleuse, die Baugrube und die neue Weserschleuse eingerichtet. Jede Anlage wird autark betrieben. Bauzeitlich sind die Anlagen temporär vernetzt. Von wenigen Ausnahmen abgesehen (z. B. Lichtlotablesung), werden die Ergebnisse aller geodätisch und händisch ausgeführten Messungen über eine Schnittstelle in die Projektdatenbank übernommen.

Die Auswertung beinhaltet alle Arbeitsgänge, die von der Erfassung des Rohwertes bis zur Ausgabe der gesuchten Zielgröße erforderlich sind. Im ersten Schritt sind die Primärwerte der Sensoren anhand ihrer Kalibrierdaten, teilweise unter Berücksichtigung von Einflussgrößen (z. B. Luftdruck, Temperatur), in die gesuchte physikalische Einheit umzurechnen. Mit geodätischen und händischen Größen wird sinngemäß verfahren. Absolute Größen lassen sich in ihrer Einheit Druck, Temperatur oder Meter über Normalnull (NN) direkt bewerten, während sich die relativen „Veränderungsbeträge“ auf einen Startwert (Nullmessung) beziehen.

Die automatische Messwertverarbeitung beinhaltet zwei bedeutende Funktionen. Eine Plausibilitätsroutine überwacht die Messwerte zuerst auf real nicht zu erwartende Bereichsüberschreitungen, die als Indiz für eine Störung oder den Ausfall von Sensoren anzusehen sind. Die Anlagen melden unplausible Werte und veranlassen dadurch einen Reparatur- oder Wartungseinsatz. Innerhalb einer weiteren Routine erfolgt die Abfrage auf Überschreitung einer der dreistufig angelegten Reaktionswerte. Die Messanlage meldet jede Überschreitung per Email und SMS an einen vorab definierten Empfängerkreis. Die Stufen fordern zur erhöhten Aufmerksamkeit, der Vorbereitung einer Reaktion und die Einleitung von Gegenmaßnahmen auf. Bei Erreichen der dritten Stufe ist die Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit des Bauwerkes weiterhin gegeben. Dieser Zustand muss aber aufgrund der Annäherung zum kritischen Wert individuell begleitet werden.

Alle Messdaten werden einer zentralen Datenbank gespeichert, deren Hardware sich im Rechenzentrum der Firma GLÖTZL befindet und über die notwendigen Sicherheitssysteme verfügt. Über geschützte Internetverbindungen und GSM erfolgen die Dateneinspeisung und der Nutzerzugriff.

Alle geohydraulischen, geotechnischen und baugemetrischen Messdaten sind über eine Datenplattform im Internet abrufbar. Mit ihren individuellen Zugangsdaten gelangen alle Nutzer auf die Startseite der Projekt-

homepage. Innerhalb einer komfortablen Menüsteuerung oder den mit Links ausgestatteten Übersichtszeichnungen lassen sich die Ganglinien aller Messdaten schnell aufrufen. Jedes Diagramm und die darin enthaltenen Messwerte sind per Dateidownload auf ein lokales Medium übertragbar. Alle Sensordaten sind zudem in Tabellenform online einsehbar.

Als offizielles Informationsmedium und zur Sicherung von Beweismitteln erhalten alle am Projekt beteiligten Institutionen wöchentlich einen Messbericht. Darin dokumentiert der AN alle Messergebnisse tabellarisch und visualisiert mit Angabe der aktuellen baulichen Situation im Bereich der Messstellen. Jeder Bericht enthält die aufgetretenen Grenzwertüberschreitungen, Betriebszustände der Sensoren und Messeinrichtungen sowie eine bautechnische Bewertung der Messergebnisse.

4.5 Auswertung und Interpretation ausgewählter Messergebnisse

Im Folgenden werden einige der in der bisher dreijährigen Messzeit ausgewerteten und interpretierten Messwerte dargestellt.

Kontrolle der Verformungen der Schachtschleuse

An den Bauwerkteilen der Schachtschleuse wurden vertikale und horizontale Verformungen in der Größenordnung von wenigen Millimetern gemessen.

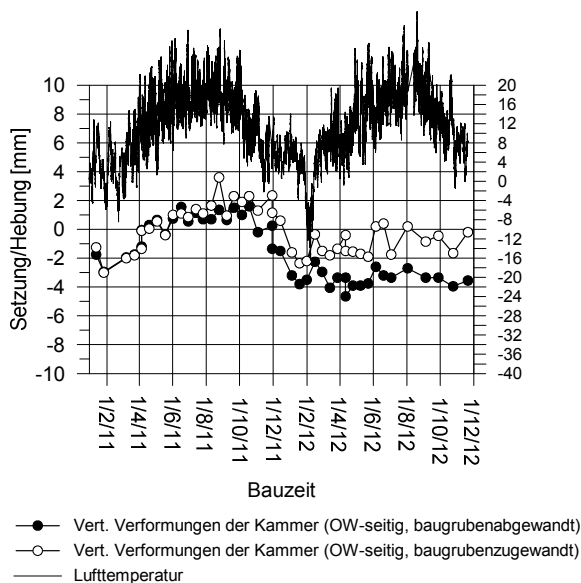


Bild 7: Vertikale Verformungen der oberwasserseitigen Kammer der Schachtschleuse

Beispielhaft sind in Bild 7 die vertikalen Verformungen der oberwasserseitigen Kammer dargestellt. Mit der Messung wurde ca. 1 Jahr vor Beginn der Baumaßnahme begonnen. Wie das Bild 7 zeigt, korrelieren die gemessenen Verschiebungen deutlich mit der Lufttemperatur.

Die vertikalen Verschiebungen schwanken vor Beginn der Baumaßnahme zwischen ± 3 mm. Diese Messwerte werden als „Normalzustand“ des Bauwerksteils bewertet. Da die Messungen nach Beginn der Baumaßnahme durch den Jahresgang infolge Temperatur überlagert sind, musste dieser Einfluss aus den Messwerten eliminiert werden, wozu die gemessenen Verschiebungen im „Normalzustand“ verwendet werden. Die temperaturkorrigierten Setzungen der Schachtschleuse betragen dann 4 mm auf der baugrubenzugewandten Seite und 7 mm auf der baugrubenabgewandten Seite. Eine Veränderung der Kammerweite infolge der Baumaßnahme wurde nicht beobachtet.

Messung des Grundwasserdrucks auf die Bohrpfahlwand und im Absperrbauwerk zum oberen Vorhafen

Eine ausführliche Beschreibung des Betriebs der Grundwasserhaltung und der Weiterverarbeitung der Grundwassermesswerte wird von Odenwald und Korsch [5] beschrieben. Unzulässig hohe Grundwasserstände traten trotz mehrerer Hochwässer während der bisherigen Bauzeit weder im Bereich der Bohrpfahlwand noch im Absperrbauwerk zum oberen Vorhafen auf.

Monitoring der Verformungen der Bohrpfahlwand

In den Bildern 8 und 10 sind die Messwerte der Inklinometer in den Messquerschnitten 1 und 3 für verschiedene Bauzustände über die Tiefe bis 10 m unter dem Fuß der Bohrpfahlwand dargestellt.

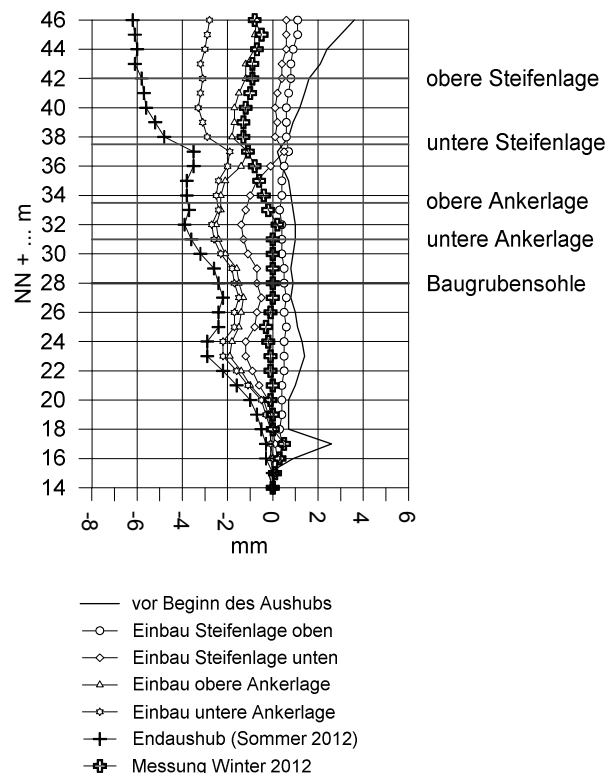


Bild 8: Gemessene Horizontalverformungen mittels Inklinometer im Messquerschnitt 1

Der Messquerschnitt 1 liegt im Bereich des zukünftigen Oberhauptes und der ausgesteiften Baugrube. Der Messquerschnitt 3 liegt in der Mitte der Hauptbaugrube und kann als charakteristisch für einen ebenen Verformungszustand angesehen werden. In den Diagrammen sind zusätzlich die Höhenlagen der Steifen bzw. der Anker eingetragen. Positive Werte sind Verformungen der Bohrpfahlwand in Richtung Baugrube zugeordnet. Die aufgetragen Werte sind Differenzverformungen bezogen auf die letzte Inklinometermessung vor Beginn des Aushubs. Bei der Bewertung der Messungen ist grundsätzlich auch die erreichbare Messgenauigkeit zu berücksichtigen, die für die 30 m langen Inklinometer im Bereich von ± 5 mm liegt [3]. Da jedoch an mindestens zwei Stellen der Bohrpfahlwand die horizontale Verformung zusätzlich mittels Extensometer redundant gemessen werden, können die mit dem Inklinometer gemessenen Werte als zutreffend angesehen werden.

Die Inklinometermessergebnisse im Messquerschnitt 1 werden zusammen mit den dort gemessenen Steifenkräften (siehe Bild 9) interpretiert.

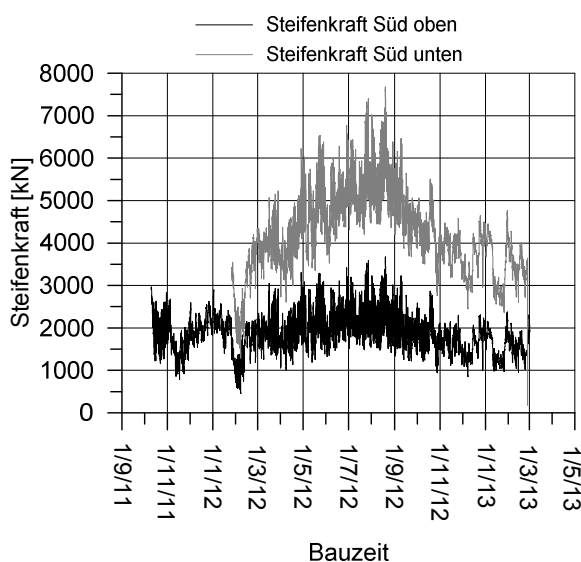


Bild 9: Gemessene Steifenkräfte im Messquerschnitt 1 während des Aushubs

Zunächst fällt auf, dass sich trotz fortschreitendem Baugrubenaushub die Bohrpfahlwand kaum zur Baugrube hin, sondern im Gegenteil von der Baugrube weg verschiebt. Zu differenzieren ist zudem ein oberer Bereich der Bohrpfahlwand mit vergleichsweise größeren Verformungen. Der sich aus den Messungen ergebende „Knick“ in der Darstellung der Verformungen über die Tiefe kann mithilfe des Baugrundaufbaus erklärt werden: Die erheblich größere Steifigkeit des unterhalb von NN + 37 m anstehenden Tonsteins behindert die Verformungen, wobei die geringen Steifigkeiten der darüber anstehenden Schichten aus Sand und Kies bzw. Auffüllung die Bewegung zulassen. Entsprechend treten in der unteren Steifenlage erheblich größere (tem-

peraturinduzierte) Kräfte auf, während die Kräfte in der oberen Steifenlage kaum schwanken, da sich die Steife ausdehnen kann.

Die Differenz der Verformungen bei Erreichen des Endaushubs der Baugrube im Sommer und dem dargestellten Messwert Winter 2012 kann daher im Wesentlichen durch Temperatureinflüsse erklärt werden.

Im Messquerschnitt 3 sind mit fortschreitendem Aushub überhaupt keine Verformungen in Richtung Baugrube aufgetreten, was wesentlich auf die nach EAB, EB 38 [1] bei Verankerungen im Fels geforderte und hier auch realisierte Vorspannung auf 100 % der Gebrauchskraft zurückgeführt wird. Einen weiteren Einfluss auf die Verformungen hat die Grundwasserabsenkung hinter der Bohrpfahlwand um ca. 10 m nach dem Einbau der zweiten Ankerlage. Hieraus ergibt sich auch im Fels eine geringfügige Setzung, die sich wiederum auf die im Bodenkörper liegende Rückverankerung und damit auch auf die Verformung der Bohrpfahlwand auswirkt.

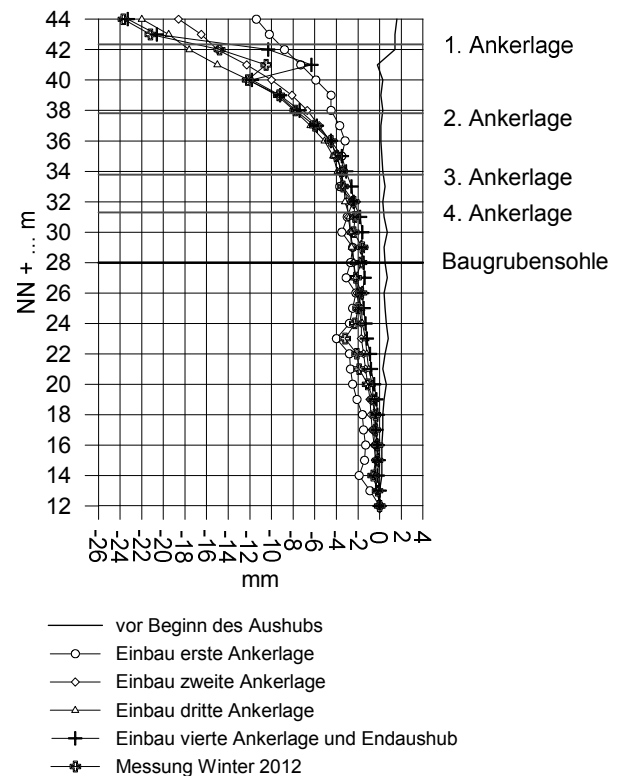


Bild 10: Gemessene Horizontalverformungen mittels Inklinometer im Messquerschnitt 3

Hebungen und Setzungen der Baugrubensohle

Mit fortschreitendem Aushub wurden zunehmende Hebungen an der Baugrubensohle gemessen. Diese sind beispielhaft für den Messquerschnitt 3 in Bild 11 dargestellt. Aufgetragen sind die Hebung für das gesamte durch die Messungen erfasste Schichtenpaket mit einer Dicke von 27 m sowie die Verformungen zwischen dem unteren und dem mittleren Verankerungspunkt

(Schichtdicke 10 m), sowie zwischen dem mittleren und dem oberen Verankerungspunkt (Schichtdicke 10 m). Zum einen lässt sich erkennen, dass auch in der untersten, durch die Extensometermessung erfassten Baugrundsicht noch geringe Hebungen messbar sind. Zum anderen zeigt sich mit zunehmender Tiefe der Baugrube ein überproportionaler Zuwachs der Hebungen, was auf die Veränderung der Spannungsverteilung mit der Tiefe und auf die zunehmende Gefügestörung des Fels durch die Baggerarbeiten zurückzuführen ist. Aufgrund der fortlaufenden Massivbauarbeiten kommt es jetzt zu einer neuen Belastung des Baugrunds und zu einer erkennbaren gegenläufigen Verformung (Setzung).

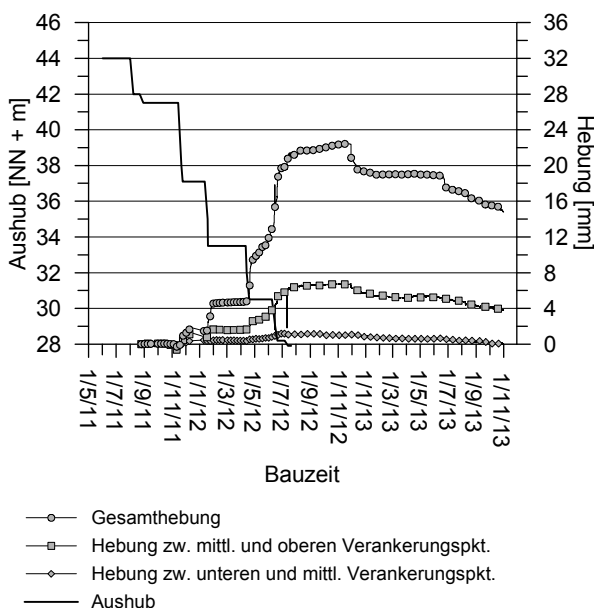


Bild 11: Gemessene Hebungen der Baugrubensohle im Messquerschnitt 3

Messungen an den Baugrubenböschungen

Unabhängig von dem hier beschriebenen Messkonzept wurden beim Aushub der Baugrube das Trennflächensystem sowie die Klassifizierungsmerkmale des Tonsteins laufend überprüft. Da bei einem ungünstigen Verlauf des Trennflächengefüges entsprechende Sicherungsmaßnahmen veranlasst wurden, war die Standsicherheit der Baugrubenböschungen jederzeit gegeben. Eine flächenhafte Überwachung der 19 Baugrubenteilböschungen erfolgte durch geodätische Messungen. Die stichprobenartig mithilfe von Extensometern gemessenen Verformungen der Baugrubenböschung an zwei Stellen waren mit max. 2 mm sehr klein und sind in der Hauptsache auf den Einfluss der Lufttemperatur bzw. die Exposition der Böschungen zur Sonne zurückzuführen. Ein Unterschied zwischen der zweidimensionalen (Messquerschnitt 3) und der dreidimensionalen Situation (herausspringende Ecke, Messquerschnitt 6) konnte nicht festgestellt werden.

5. Schlussbemerkungen

Die sich aus der Zielstellung einer Risikominimierung für die Baumaßnahme ergebenden Messaufgaben (siehe Kapitel 4) konnten mit dem aufgestellten Messkonzept und den gewählten Messverfahren erfüllt werden. Kritische Messwerte traten bis zu diesem Zeitpunkt nicht auf.

Die Aufrechterhaltung der Funktionsfähigkeit eines so umfangreichen Messkonzeptes über mehrere Jahre Bauzeit stellt für alle Beteiligten einen enormen Aufwand dar. Entscheidend für den Erfolg sind außer einer sorgfältigen Umsetzung des Messkonzeptes auf der Baustelle eine genügende Anzahl redundanter Messungen, die kontinuierliche Pflege der Datenbank sowie die ständige Überprüfung und Wartung der Messanlage. Für die Interpretation muss der Bauablauf so genau dokumentiert sein, dass dieser den einzelnen Messungen zugeordnet werden kann. Wichtig sind außerdem genügend Kontrollinstanzen, die diejenigen innehaben sollten, die das größte Interesse an den Messergebnissen haben [2].

Literatur

- [1] Empfehlungen des Arbeitsausschusses Baugruben, EAB, 4. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin, 2007.
- [2] Dunncliff, J.: Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance, John Wiley & Sons, Inc., ISBN 0-471-00546-0
- [3] Mikkelsen, P.: Advances in Inclinometer Data Analysis. Symposium on Field Measurements in Geomechanics, FMGM 2003, Oslo, Norway, September 2003
- [4] Neumann, S.: Messtechnik und Vermessung für den Neubau der Weserschleuse Minden, VDVmagazin Heft 6/2013
- [5] Odenwald, B., Korsch, T.: Grundwasserhaltung im klüftigen Fels für die Baugrube der neuen Weserschleuse Minden, bbr-Jahresmagazin 2013 (12/2013)